PERANCANGAN SISTEM *REVERSE SUPPLY CHAIN* UNTUK LIMBAH ELEKTRONIK DENGAN APLIKASI RevME DAN ALGORITMA *VEHICLE ROUTING PROBLEM* (VRP)

KARYA ILMIAH INI DIAJUKAN UNTUK MENGIKUTI PEMILIHAN MAHASISWA BERPRESTASI TINGKAT NASIONAL

OLEH

MUHAMMAD AFIF PURWANDI

NIM. 02411640000020

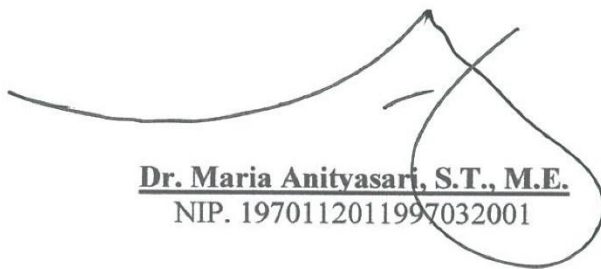
DEPARTEMEN TEKNIK INDUSTRI

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER (ITS)

TAHUN 2019

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Karya Tulis	: Perancangan Sistem *Reverse Supply Chain* untuk Limbah Elektronik dengan Aplikasi RevME dan Algoritma *Vehicle Routing Problem* (VRP)
Bidang Karya Tulis	: Teknologi
Nama	: Muhammad Afif Purwandi
NIM	: 02411640000020
Departemen	: Teknik Industri
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri
Universitas/Institut	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Dosen Pembimbing	: Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E.
NIP	: 197011201199703200001

Surabaya, 4 April 2019

Dosen Pembimbing,

Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E.
NIP. 197011201199703200

Mahasiswa,

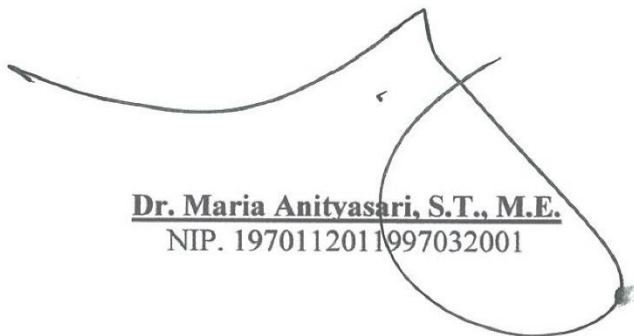
Muhammad Afif Purwandi
NIM. 02411640000020

Wakil Rektor
Bidang Akademik dan Kemahasiswaan

Prof. Dr. Ir. Heru Setyawan, M.Eng
NIP. 196702031991021001

SURAT PERNYATAAN

Saya bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: Muhammad Afif Purwandi
Tempat/Tanggal Lahir	: Madiun, 23 Maret 1998
Program Studi	: Teknik Industri
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Judul Karya Tulis	: Perancangan Sistem *Reverse Supply Chain* untuk Limbah Elektronik dengan Aplikasi RevME dan Algoritma *Vehicle Routing Problem* (VRP)

Dengan ini menyatakan bahwa Karya Tulis Ilmiah yang saya sampaikan pada kegiatan Pilmapres ini adalah benar karya saya sendiri tanpa tindakan plagiarisme dan belum pernah diikutsertakan dalam lomba karya tulis.

Apabila di kemudian hari ternyata pernyataan saya tersebut tidak benar, saya bersedia menerima sanksi dalam bentuk pembatalan predikat Mahasiswa Berprestasi.

Surabaya, 4 April 2019

Mengetahui
Dosen Pembimbing,

Yang menyatakan

METERAI TEMPEL
A8E29AFF439995383
6000 ENAM RIBU RUPIAH

Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E.
NIP. 197011201997032001

Muhammad Afif Purwandi
NIM. 02411640000020

KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan karya yang berjudul **"Perancangan Sistem *Reverse Supply Chain* untuk Limbah Elektronik dengan Aplikasi RevME dan Algoritma *Vehicle Routing Problem* (VRP)"**.

Penulis menyadari bahwa karya ini dapat terselesaikan atas bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa
2. Departemen Teknik Industri ITS
3. Laboratorium *Logistics and Supply Chain Management* (LSCM) Teknik Industri ITS
4. Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E., Dr. Eng, Ir. Ahmad Rusdiansyah, M.Eng., dan Achmad Ferdiansyah Pradana, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing
5. Orang tua
6. Semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam menyelesaikan makalah ini.

Semoga segala bantuan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan dari Tuhan Yang Maha Esa. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan karya ini. Untuk itu, segala saran dan kritik dari para pembaca sangat dibutuhkan demi kesempurnaan penyusunan laporan di masa yang akan datang.

Akhirnya dalam kesederhanaan bentuk ini, semoga karya tulis ini dapat memberikan manfaat bagi pembacanya.

Muhammad Afif Purwandi

RINGKASAN

Pada tahun 2016, masyarakat dunia menghasilkan 44,7 juta ton limbah elektronik dan diprediksi meningkat pada tahun 2021 di angka 52,2 juta ton. Limbah elektronik di Indonesia berjumlah 1,27 juta ton atau rata-rata 4,9 kilogram per kapita sepanjang 2016 dan diprediksi selalu meningkat setiap tahunnya. Sebagai negara produsen limbah elektronik tertinggi ke-9 di dunia, sistem pengolahan limbah elektronik di Indonesia termasuk dalam kategori paling rendah yaitu Inisiatif Informal. Pengolahan limbah elektronik yang tidak tepat dapat menyebabkan dampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan karena terdapat banyak kandungan berbahaya pada limbah elektronik. Di sisi lain, pengolahan limbah elektronik yang baik dapat memberikan dampak positif yang besar bagi negara dan pelaku bisnis. Pada tahun 2016, limbah elektronik di dunia mengandung nilai ekonomis lebih dari $55 milliar atau sekitar 825 trilliun rupiah. Namun, jumlah limbah elektronik yang dikembalikan oleh masyarakat dan diolah oleh perusahaan hanya berkisar pada nilai 15-20% dari jumlah keseluruhan. Berdasarkan permasalahan dan potensi yang ada, karya ini disusun dan memiliki tujuan untuk: (1) merancang aplikasi RevME dan algoritma VRP untuk mempermudah pengambilan limbah elektronik, (2) merancang penerapan aplikasi RevME untuk memperoleh data produk elektronik, (3) merancang model bisnis sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik, (4) mengetahui potensi nilai ekonomis yang dapat diraih pada bisnis tersebut. Karya ini diharapkan mampu untuk mempermudah pengelolaan limbah elektronik sehingga limbah tersebut memiliki nilai jual yang tinggi dan tidak berbahaya bagi lingkungan serta kesehatan.

Dalam karya ini, terdapat dua metodologi yang telah dilakukan yaitu metode pencarian informasi dan pengembangan model VRP. Metode pencarian informasi dilakukan dengan melakukan studi pustaka untuk mengkaji literatur serta jurnal yang berhubungan dengan limbah elektronik, algoritma VRP, dan pengembangan aplikasi *mobile*. Selain itu, metode wawancara dilakukan kepada masyarakat dan ahli untuk mendapatkan permasalahan limbah elektronik dan alternatif yang dapat dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Pada pengembangan

model, algoritma VRP disusun dengan menggunakan algoritma *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time-Window* (CVRPTW) dengan modifikasi pemilihan konsumen. Algoritma tersebut digunakan untuk mengolah data yang masuk pada aplikasi RevME.

Dalam karya ini, dapat disimpulkan bahwa: (1) aplikasi RevME bekerja dengan mengidentifikasi data limbah elektronik konsumen. RevME dapat menerima data berat, jenis, volume, spesifikasi, lokasi, dan waktu pengambilan limbah elektronik yang diharapkan. RevME juga memiliki fitur-fitur untuk memberikan informasi produk elektronik konsumen. Untuk mengatur penjadwalan pengambilan limbah secara efisien, algoritma VRP disusun menggunakan jenis *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time-Window* (CVRPTW) dengan modifikasi pemilihan konsumen, (2) penerapan aplikasi RevME untuk memperoleh data produk elektronik konsumen dapat dilakukan pada saat proses jual beli antara penjual dan pembeli. Data ini dapat digunakan untuk banyak hal seperti memberikan informasi tentang keandalan produk, densitas permintaan pada suatu lokasi, siklus hidup produk elektronik, dan perilaku pasar, (3) model bisnis sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik mengedepankan nilai keberlanjutan, fleksibilitas, dan nilai ekonomis limbah elektronik. Bisnis ini memiliki pemasukan melalui penjualan limbah elektronik, penjualan informasi produk elektronik, dan kerjasama dengan entitas bisnis, (4) potensi nilai ekonomis pada limbah elektronik yang dapat diraih adalah sebesar Rp 1,84 trilliun per tahun. Nilai tersebut berasal dari perhitungan pendekatan empat sampel produk yaitu TV, HP, *PC Desktop,* dan laptop. Nilai proyeksi keseluruhan limbah elektronik di Indonesia yang dapat dimanfaatkan oleh sistem ini adalah sebesar Rp 18 trilliun per tahun.

Melalui sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik dengan aplikasi RevME dan algoritma VRP, terdapat lima pilar pada *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang dapat diraih yaitu *Clear Water and Sanitation (Goal 6), Industry, Innovation, and Infrastructure (Goal 9), Sustainable Cities and Communities (Goal 11), Responsible Consumption and Production (Goal 12),* dan *Life on Land (Goal 15)*. Maka dari itu, implementasi dari karya ini dapat berkontribusi pada pencapaian beberapa tujuan di SDGs.

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR TABEL

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Limbah elektronik merupakan peralatan elektronik atau listrik yang sudah tidak terpakai seperti ponsel rusak, baterai dan lampu neon bekas pakai, komputer usang, dan lain-lain. Pada tahun 2016, masyarakat dunia menghasilkan 44,7 juta ton limbah elektronik dan diprediksi meningkat pada tahun 2021 di angka 52,2 juta ton per tahun (Baldé et al., 2017). Data tersebut juga menunjukkan bahwa Indonesia terletak pada posisi ke-9 pada penghasil limbah elektronik terbesar di dunia dengan China di peringkat satu dan disusul oleh Amerika Serikat. Limbah elektronik yang dihasilkan oleh penduduk Indonesia selalu meningkat setiap tahun dan diprediksi berjumlah 1,274 juta ton atau rata-rata 4,9 kilogram per kapita sepanjang 2016. Untuk menilai sistem pengelolaan limbah elektronik di suatu negara, terdapat empat kategori pemetaan yaitu *Advanced Mechanism, Voluntary Initiative, In Transition,* dan *Informal Initiative* (UNU, 2017). Sistem pengelolaan limbah elektronik di Indonesia termasuk dalam kategori paling rendah yaitu *Informal Initiative*. Pada kategori ini, negara tidak memiliki aturan hukum yang kuat, fasilitas daur ulang resmi yang terbatas, dan pengelolaannya dikuasai oleh sektor informal.

Pengelolaan limbah elektronik yang tidak tepat dapat menyebabkan dampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan manusia karena terdapat banyak kandungan zat berbahaya di dalamnya. Kandungan berbahaya tersebut di antaranya adalah merkuri, kadmium, polivinil klorida, timbal, berilium, kromium, arsenik, perak, kobalt, palladium, dan tembaga (UNEP, 2007). Beberapa zat tersebut termasuk dalam kategori zat karsinogenik atau zat yang dapat menyebabkan kanker (IARC, 2012). Selain itu, limbah elektronik juga dapat memberikan dampak buruk bagi kesehatan mental dan perkembangan saraf. Pada tahun 2012, terdapat 2.274 kasus anak yang terserang gangguan mental dan saraf akibat pengaruh limbah elektronik di Cina Tenggara (Grant et al., 2013). Pengelolaan limbah elektronik yang baik sangat diperlukan untuk mencegah dampak buruk yang ditimbulkan bagi kesehatan dan lingkungan.

Pengelolaan limbah elektronik yang baik dapat memberikan dampak positif yang besar. Pada tahun 2016, nilai bahan pada limbah elektronik di dunia bernilai lebih dari $55 milliar atau sekitar 825 trilliun rupiah (UNU, 2017). Hal tersebut diperkirakan karena di dalam satu ton limbah elektronik terdapat sekitar 1,44 kg emas, perak, tembaga, dan komoditas lain yang memiliki nilai jual tinggi. Komoditas tersebut dapat dimanfaatkan kembali melalui serangkaian proses daur ulang sehingga mampu membawa nilai ekonomis yang tinggi.

Namun, jumlah limbah elektronik yang dikembalikan oleh masyarakat dan diolah hanya berkisar pada nilai 15-20% dari jumlah keseluruhan karena rendahnya informasi tentang pengelolaan limbah elektronik (Nnorom et al., 2008). Hal tersebut menyebabkan perusahaan enggan untuk melakukan investasi dalam mengolah limbah elektronik karena rendahnya jumlah limbah elektronik yang terkumpul sehingga berakibat pada rendahnya nilai ekonomis yang dapat diraih. Permasalahan limbah elektronik sangat berkaitan dengan lima tujuan pada SDGs yaitu *Clean Water and Sanitation (Goal 6), Industry, Innovation, and Infrastructure (Goal 9), Sustainable Cities and Communities (Goal 11), Responsible Consumption and Production (Goal 12),* dan *Life on Land (Goal 15*).

Berdasarkan masalah dan potensi yang ada, maka dibuatlah **inovasi sistem *reverse supply chain* untuk mendukung upaya pengelolaan limbah elektronik**. Sistem ini terdiri dari aplikasi *mobile* RevME dan algoritma VRP. RevME memiliki prinsip kerja untuk mendapatkan informasi limbah elektronik konsumen agar limbah tersebut dapat dikumpulkan dan diolah. RevME juga dapat memberikan informasi kepada konsumen tentang produk elektronik yang dimiliki. Data yang masuk pada aplikasi RevME akan diolah dengan algoritma VRP untuk mengatur penjadwalan pengambilan limbah elektronik. Sistem ini diharapkan mampu untuk mempermudah pengelolaan limbah elektronik sehingga limbah tersebut memiliki nilai jual yang tinggi dan tidak berbahaya bagi lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada karya ini yaitu:

1. Bagaimana aplikasi RevME dan algoritma *Vehicle Routing Problem* (VRP) dirancang untuk mempermudah pengambilan limbah elektronik?

2. Bagaimana mekanisme penerapan aplikasi RevME untuk memperoleh data produk elektronik konsumen?
3. Bagaimana model bisnis sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik?
4. Bagaimana potensi nilai ekonomis yang dapat diraih pada sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik?

1.3 Tujuan

Tujuan yang akan dicapai dari karya ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang aplikasi RevME dan algoritma *Vehicle Routing Problem* (VRP) untuk mempermudah pengambilan limbah elektronik.
2. Merancang mekanisme penerapan aplikasi RevME untuk memperoleh data produk elektronik konsumen.
3. Merancang model bisnis sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik.
4. Mengetahui potensi nilai ekonomis yang dapat diraih pada sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik.

1.4 Manfaat

Manfaat yang dapat diperoleh dari karya ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem ini dapat memberikan meminimalisir bahaya limbah elektronik bagi lingkungan dan kesehatan.
2. Sistem ini dapat dimanfaatkan oleh perusahaan dan pemerintah untuk mendapatkan data produk elektronik yang telah terjual.
3. Sistem ini dapat meningkatkan nilai jual limbah elektronik dan memberikan keuntungan baik bagi masyarakat, perusahaan, dan entitas pendaur ulang.

1.5 Batasan dan Asumsi

Batasan dan asumsi dari karya ini adalah sebagai berikut:

1. Mekanisme kompensasi limbah elektronik belum diperhatikan (batasan).
2. Proses pengolahan limbah elektronik dan metode pengangkutan limbah elektronik belum diperhatikan (batasan).
3. Jumlah, jenis, dan kapasitas kendaraan pengambil limbah ditentukan secara *dummy* (asumsi).

BAB 2
TELAAH PUSTAKA

2.1 Limbah Elektronik

Limbah elektronik atau (*e*-waste) adalah perangkat elektronik yang berupa limbah yaitu segala benda atau objek yang tidak dapat terpakai termasuk semua komponen dan *sub-assembly* (EMPA, 2004). Terdapat banyak jenis dari limbah elektronik atau *e-waste* seperti komputer/laptop, telepon genggam, *charger*, camera, *powerbank*, VCD/DVD, TV, *printer*, baterai, dan lain-lain. Limbah elektronik merupakan limbah yang memerlukan penanganan khusus karena dapat menyebabkan gangguan bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Dalam aspek lingkungan, limbah elektronik dapat mencemari tanah dan udara, menyebabkan asidifikasi tanah, dan lain-lain. Dalam aspek kesehatan manusia, limbah elektronik dapat menyebabkan efek karsinogenik, mutagenik, dan efek berbahaya lainnya. Hal tersebut dapat terjadi karena limbah elektronik merupakan limbah beracun dan tidak dapat terurai karena mengandung berbagai macam material yang sebagian besar termasuk dalam kategori barang berbahaya dan beracun seperti logam berat, PVC, merkuri, dan lain-lain. Tabel 1 menjelaskan beberapa bahan kimia yang ada dalam satu unit komputer desktop serta bahaya yang ditimbulkan bagi lingkungan dan kesehatan manusia.

Tabel 1. Bahan Kimia dalam Satu Unit Komputer Desktop

Bahan Kimia	Berat (%)	Dampak Negatif
Silika	24,88	Silikosis, bronkitis, kanker
Timbal	6,29	Penurunan pertumbuhan dan reproduksi tumbuhan & hewan, kerusakan sistem syaraf pada manusia
Alumunium	14,7	Menurunkan pertumbuhan tanaman, alzhemier.
Besi	20,47	Kerusakan DNA, protein, lipida, dan komponen sel lainnya.
Plastik	22,99	Jika dibakar mengeluarkan asap yang mengandung dioksin yang bersifat karsinogenik.

Sumber: Kartika, 2008

2.2 Upaya Pengelolaan Limbah Elektronik

Hingga tahun 2019, upaya pengelolaan limbah elektronik sudah dilakukan oleh pemerintah Indonesia. Pemerintah melakukan upaya pengelolaan limbah elektronik dengan beberapa regulasi seperti PP No. 101 Tahun 2014 tentang Pengolahan Limbah B3, PP No. 81 Tahun 2012 tentang *Extended Producers Responsibility* (EPR), dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup (LH) No. 3 Tahun 2014 tentang PROPER dan *Life Cycle Assessment*. Pemerintah juga menerapkan sistem *drop box* pada beberapa titik di Jakarta.

Di sisi lain, belum ada perusahaan elektronik di Indonesia yang memiliki sistem pengelolaan limbah elektronik yang baik. Apabila dibandingkan dengan negara maju, perusahaan LG Amerika Utara telah menerapkan sistem pengelolaan limbah elektronik dengan baik dan mendapatkan penghargaan oleh *Environmental Protection Agency* (EPA). *LG Electronics North America* mampu untuk mengolah lebih dari 21.000 ton limbah elektroniknya di mana hal tersebut setara dengan mencegah lebih dari 55.000 ton emisi CO_2. Upaya pengelolaan limbah elektronik di Indonesia masih bersifat reaktif dengan menunggu kemauan masyarakat untuk meletakkan limbah elektronik pada *drop box*. Selain itu, belum adanya integrasi antara pemerintah dan pelaku bisnis serta kurangnya pendekatan teknologi dalam pengelolaan limbah elektronik yang beredar menyebabkan metode pengelolaan limbah elektronik yang beredar masih kurang efektif dan efisien.

2.3 *Reverse Supply Chain*

Reverse Supply Chain adalah serangkaian aktivitas untuk mengembalikan produk yang telah memasuki masa akhir hidup atau *End of Life* (EOL). Menurut Guide and Wassenhove (2002), *reverse supply chain* terdiri dari lima komponen utama yaitu akuisisi produk, *reverse logistics*, inspeksi dan disposisi, *reconditioning*, dan penjualan serta distribusi. Akuisisi produk adalah sebuah proses untuk mendapatkan produk dari konsumen; *reverse logistic* adalah proses untuk mengirim produk kepada suatu fasilitas untuk memasuki proses *inspecting, sorting*, dan *disposition*; inspeksi dan disposisi adalah proses untuk menilai kondisi dari produk yang dikembalikan; *reconditioning* adalah proses untuk meningkatkan nilai jual produk; penjualan dan distribusi merupakan proses akhir yaitu mengembalikan produk yang sudah diolah kembali ke pasar.

Reverse Supply Chain dapat memberikan banyak manfaat bagi perusahaan dan lingkungan. Bagi perusahaan, peningkatan pendapatan melalui pengolahan nilai ekonomis produk dapat diraih karena perusahaan mendapatkan suplai bahan baku tambahan dalam proses produksinya. Selain itu, perusahaan juga akan mendapatkan persepsi publik yang baik akibat melakukan *reverse supply chain*. Bagi lingkungan, dampak buruk pada limbah yang dihasilkan oleh perusahaan dapat dikurangi karena terdapat proses pengelolaan yang baik. Pada implementasinya, *reverse supply chain* melibatkan kerjasama dengan banyak pihak seperti kerjasama dengan perusahaan logistik dalam proses distribusi dan kerjasama dengan perusahaan pendaur ulang.

2.4 *Vehicle Routing Problem*

Vehicle Routing Problem (VRP) adalah sebuah algoritma yang memiliki tujuan untuk mencari rute dari depot (gudang) ke konsumen yang dapat meminimasi biaya perjalanan dengan mencari rute terdekat dan meminimasi jumlah kendaraan. Solusi dari VRP adalah berupa rute-rute yang dapat ditempuh kendaraan untuk mengantarkan atau mengambil seluruh permintaan konsumen. VRP memiliki beberapa karakteristik yang perlu diperhatikan yaitu konsumen, depot atau gudang, pengemudi, dan kondisi jalan (Toth dan Vigo, 2002).

VRP memiliki beberapa tipe seperti *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), *Vehicle Routing Problem with Time Window* (VRPTW), *Vehicle Routing Problem with Backhauls* (VRPB), *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Window* (CVRPTW), dan lain-lain. Pada CVRP, terdapat kapasitas angkut sebagai kendala yang dihadapi untuk memenuhi permintaan konsumen. Pada VRPTW, terdapat kendala waktu pengambilan atau pengantaran di mana konsumen memiliki interval waktu tertentu untuk dilayani atau yang disebut dengan *time-windows*. Pada VRPB, konsumen memiliki dua kondisi di mana kondisi pertama adalah konsumen memiliki permintaan untuk dikirimkan barang pesanan dan kondisi kedua adalah konsumen memiliki permintaan untuk diambil barangnya. Pada CVRPTW, terdapat kapasitas angkut dan interval waktu pelayanan pelanggan sebagai batasan pada permasalahan tersebut. Pada aplikasinya, algoritma VRP harus disesuaikan dengan permasalahan yang ingin diselesaikan yang ada untuk dapat meraih hasil keputusan yang optimal.

BAB 3
METODOLOGI

3.1 Metode Pengumpulan Informasi

Pengumpulan informasi dalam karya ini dilakukan dengan metode studi pustaka. Studi pustaka dilakukan dengan mengkaji literatur, artikel, dan jurnal yang membahas tentang limbah elektronik dan juga tentang algoritma *Vehicle Routing Problem* (VRP) sebagai metode untuk mengolah data yang didapat. Selain itu, studi pustaka juga dilakukan dengan mengkaji literatur tentang pembuatan *mobile-based application* dan manajemen basis data.

3.2 Pengembangan Aplikasi RevME

Aplikasi RevME dibuat dengan menggunakan *software* Android Studio. Dalam menyimpan data, aplikasi RevME menggunakan layanan basis data buatan Google yaitu Firebase. Layanan basis data tersebut dipilih karena mampu untuk memberikan informasi secara *real-time*. Selain itu, aplikasi RevME juga menggunakan layanan peta buatan Google yaitu Google Maps. Layanan peta digunakan untuk mengetahui lokasi konsumen dan kurir dalam proses pengambilan limbah elektronik.

3.3 Pengembangan Model VRP

Model VRP digunakan dalam mengoptimasi proses pengambilan limbah elektronik. Pada karya ini, jenis *Vehicle Routing Problem* yang digunakan adalah *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time-Window* (CVRPTW) dengan modifikasi pemilihan konsumen. Hal ini dikarenakan karya ini memiliki karakteristik kapasitas angkut, batasan waktu pengambilan konsumen, dan keputusan pengambilan konsumen berdasarkan analisis nilai produk.

Formulasi permasalahan dari model VRP ini adalah sebagai berikut:

Parameter:

$NN =$ Jumlah konsumen

$NV =$ Jumlah kendaraan

$C =$ Kapasitas kendaraan (berat)

$Q_j =$ Permintaan (berat)pada konsumen j

$J_{ij} =$ Jarak perjalanan i ke j ($J_{jj} = \infty$)

$S_j =$ Waktu *loading unloading* pada konsumen j

$E_j =$ Waktu awal konsumen j dapat dilayani

$L_j =$ Waktu akhir konsumen j dapat dilayani

M = Bilangan besar (konstan)

$A_{kj} =$ Waktu kedatangan kendaraan k pada konsumen j

$S_j =$ Waktu pelayanan konsumen j

$W_{kj} =$ Waktu tunggu kendaraan k pada konsumen j

$P_j =$ Nilai produk konsumen j

Kumpulan *node*:

N(k) = kumpulan *nodes* yang dikunjungi oleh kendaraan k

T(k) = kumpulan kendaraan yang digunakan pada solusi

Variabel:

$$l_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{apabila terdapat perjalanan dari i ke j} \\ 0, & \text{apabila tidak terdapat perjalanan dari i ke j} \end{cases}$$

$$V_k = \begin{cases} 1, & \text{apabila kendaraan k digunakan} \\ 0, & \text{apabila kendaraan k tidak digunakan} \end{cases}$$

Fungsi Tujuan:

$$\text{Min} \quad Z = M \times \underbrace{\textstyle\sum_{1}^{NV} Vk}_{A} + \sum_{i=o}^{NN} \underbrace{\textstyle\sum_{j=0}^{NN}}_{B} \sum_{k=1}^{NV} l_{ijk} \times d_{ij} \qquad (1)$$

Konstrain:

$$\sum_{i=0}^{NN} \sum_{k=1}^{NV} l_{ijk} = \sum_{i=0}^{NN} \sum_{k=1}^{NV} l_{jik} \quad \text{untuk semua } j \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{NN} \sum_{k=1}^{NV} l_{ijk} = 1 \quad \text{untuk semua } j \qquad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{NN} \{Q_j \sum_{i=0}^{NN} l_{ijk}.\} \leq C \quad \text{untuk semua k} \qquad (4)$$

$$\sum_{i=0}^{NN} l_{ijk} - \sum_{j=1}^{NN} l_{jik} = 0 \quad \text{untuk semua k} \qquad (5)$$

$$\sum_{i=0}^{NN} \sum_{j=0}^{NN} l_{ijk} \leq M \times V_k \quad \text{untuk semua k} \qquad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{NN} l_{0jk} - V_k = 0 \quad \text{untuk semua k} \qquad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{NN} l_{i0k} - V_k = 0 \quad \text{untuk semua k} \qquad (8)$$

$$A_{k_j} = A_{k_{j-1}} + S_{j-1} + t_{j-1,j} \quad \text{untuk semua } j \in \text{N}(k), k \qquad (9)$$

$$A_{k_j} = \text{Max}\left\{E_j, A_{k_{j-1}} + S_{j-1} + t_{j-1,j}\right\} \text{ untuk semua } j \in \text{N}(k), k \qquad (10)$$

$W_{k_j} = \text{Max}\left\{0, E_j - \left(A_{k_{j-1}} + S_{j-1} + t_{j-1,j}\right)\right\}$ untuk semua $j \in \text{N}(k), k$ (11)

$A_{k_j} \leq L_j$ untuk semua $j \in \text{N}(k), k$ (12)

$\sum t_{j-1,j} + \sum j\, w_{k_j} + \sum j\, S_{k_j} \leq 720$ untuk semua $j \in \text{N}(k), k$ (13)

$\sum_{i=0}^{NN} \sum_{k=1}^{NV} l_{ijk} \times J_{ij} \times 849.13 \leq P_j + P_j * 20\%$ untuk semua j (14)

Berdasarkan formulasi diatas, Tabel 2 merupakan penjelasan dari fungsi tujuan dan konstrain.

Tabel 2. Keterangan Formulasi

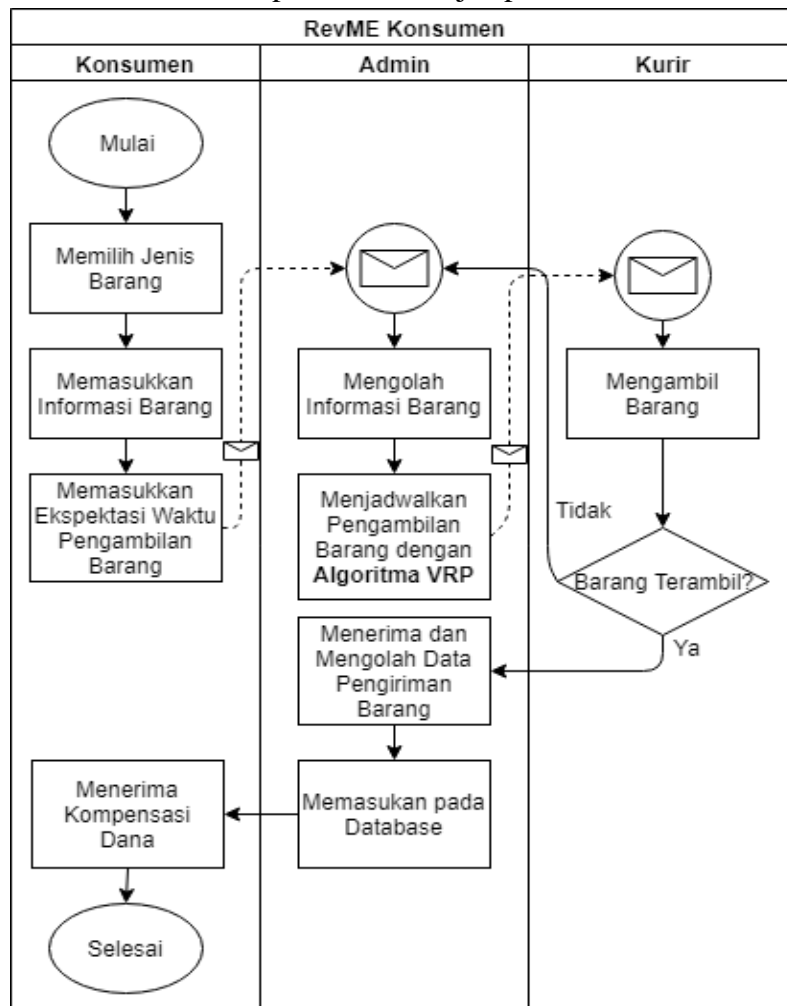
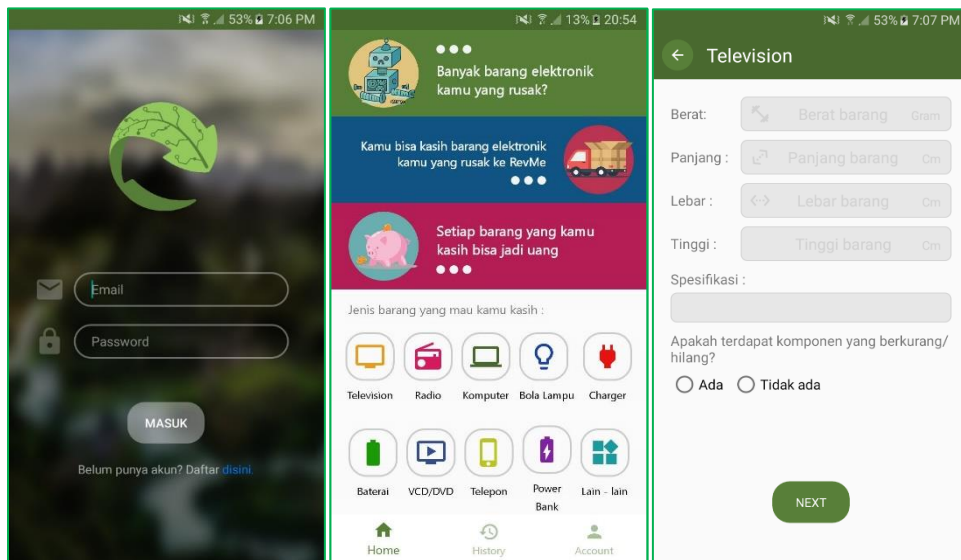
Nomor	Keterangan
1	Formulasi A digunakan untuk meminimasi jumlah kendaraan yang digunakan dan formulasi B digunakan untuk meminimasi total jarak perjalanan. Huruf M menunjukkan angka besar yang digunakan untuk memprioritaskan tujuan jumlah kendaraan dibanding total waktu perjalanan karena hal tersebut mempengaruhi biaya operasional secara signifikan
2	Menunjukkan jumlah kendaraan yang keluar adalah sama dengan jumlah kendaraan yang masuk
3	Menunjukkan satu konsumen hanya dapat didatangi oleh satu kendaraan
4	Menunjukkan jumlah barang yang diangkut tidak boleh melebihi kapasitas kendaraan
5	Menunjukkan bahwa setiap kendaraan yang mengunjungi satu *node* pasti akan meninggalkan *node* tersebut
6	Memastikan bahwa nilai *Vk* adalah 1 apabila kendaraan *k* digunakan.
7 & 8	Menunjukkan bahwa kendaraan harus berangkat dan kembali ke depot
9	Mengkalkulasi waktu kedatangan apabila kendaraan sampai pada konsumen sebelum *Ej* atau waktu awal konsumen dapat dilayani
10	Menunjukkan waktu kedatangan pada konsumen *j* adalah waktu kedatangan pada konsumen *j-1* ditambah dengan waktu pelayanan konsumen *j-1* ditambah perjalanan dari konsumen *j-1* ke *j*
11	Mengkalkulasi waktu tunggu kendaraan apabila telah sampai pada konsumen sebelum *Ej* atau waktu awal konsumen dapat dilayani.
12	Menunjukkan waktu kedatangan tidak boleh lebih dari *Lj* atau waktu akhir konsumen dapat dilayani
13	Menunjukkan total waktu operasi kendaraan yang tidak boleh melebihi 12 jam per hari
14	Menunjukkan bahwa biaya perjalanan untuk mengunjungi suatu konsumen yang dilambangkan melalui jarak dikali dengan biaya bahan bakar/liter (Pertamax) tidak boleh lebih dari nilai produk ditambah keuntungan sebesar 20%

BAB 4
ANALISIS DAN SINTESIS

4.1 Perancangan Aplikasi RevME dan Algoritma VRP

Berdasarkan pada Lampiran 1, RevME memiliki dua fungsi utama yaitu fungsi dalam pengambilan limbah elektronik dan juga fungsi dalam memberikan informasi konsumen seputar produk elektronik yang dimiliki. Berikut adalah penjelasan dari masing-masing fungsi tersebut.

4.1.1 RevME dan VRP dalam Pengambilan Limbah Elektronik

RevME adalah aplikasi yang memiliki fungsi untuk mendapatkan informasi limbah elektronik konsumen. Informasi tersebut antara lain berupa jenis, spesifikasi, foto, dan tanggal serta waktu pengambilan barang limbah elektronik. Gambar 1 menampilkan alur kerja aplikasi RevME.

Gambar 1. Alur Kerja Aplikasi RevME Konsumen

Gambar 2. Antarmuka *Login* RevME

Gambar 3. Antarmuka Pemilihan Produk

Gambar 4. Antarmuka Informasi Produk

Aplikasi RevME bekerja diawali dengan **konsumen** yang memasukkan e-mail dan *password* pada aplikasi (Gambar 2). Setelah itu, konsumen memilih produk limbah elektronik yang ingin dikembalikan (Gambar 3). Apabila produk sudah terpilih, konsumen memasukkan informasi tentang limbah elektronik yang mereka miliki (Gambar 4). Informasi tersebut berupa jenis barang, spesifikasi barang, keadaan barang, dan tanggal serta pengambilan barang yang diharapkan. Informasi ini akan secara otomatis tersimpan dalam sebuah basis data untuk dapat diolah.

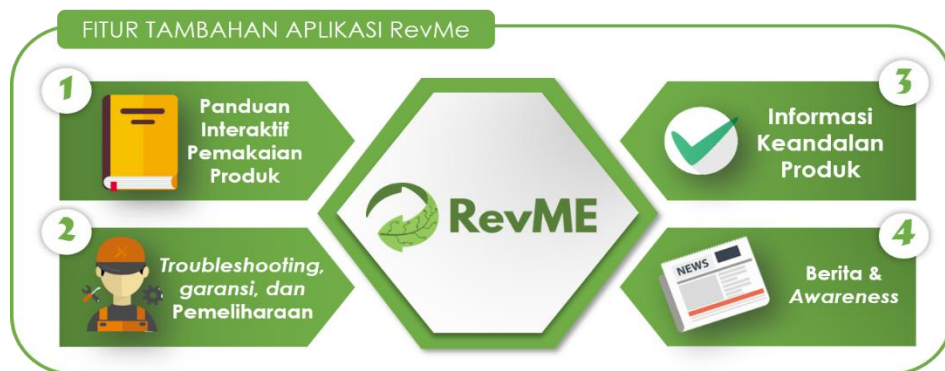
Setelah data tersimpan, **admin** mengolah data tersebut melalui *platform* yang sudah tersedia. Admin akan memproses data tersebut untuk membuat penjadwalan pengambilan limbah elektronik agar efisiensi pengambilan limbah tercapai. Admin melakukan penjadwalan dengan bantuan algoritma *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time-Window* (CVRPTW) dengan modifikasi pemilihan konsumen (Lampiran 3). Penjadwalan tersebut dapat memberikan petunjuk bagi operator yang bertugas untuk mengambil barang sesuai lokasi, waktu, dan detail spesifikasi barang yang akan diambil.

Apabila data telah diproses dan seluruh informasi telah diberikan kepada **kurir**, limbah elektronik diambil oleh kurir sesuai dengan informasi yang ada. Selanjutnya, kurir akan melakukan konfirmasi pengambilan barang kepada

admin. Admin akan mengolah data limbah elektronik konsumen dan mengirimkan kompensasi sesuai dengan jenis dan kondisi limbah elektronik yang ada. Kompensasi diberikan kepada rekening konsumen sesuai dengan rekening yang telah dimasukkan pada data konsumen di detail informasi akun.

Setelah itu, kurir akan mengirimkan produk limbah elektronik ke **gudang** terdekat untuk dapat disimpan. Limbah elektronik nantinya akan dikirim kepada **perusahaan manufaktur** produk elektronik dan **perusahaan pengolah limbah** elektronik untuk dapat diolah.

4.1.2 RevME dalam Pemberian Informasi Produk Elektronik

Untuk menambah *customer experience* dalam menggunakan aplikasi, RevME juga memiliki beberapa fitur tambahan dalam pemberian informasi produk. Gambar 5 merupakan penjelasan dari fitur-fitur tambahan RevME.

Gambar 5. Fitur Tambahan Aplikasi RevME

1. Panduan Interaktif Pemakaian Produk

Pada fitur ini, konsumen mendapatkan informasi tentang cara penggunaan produk elektronik yang mereka miliki berupa video interaktif secara detail dan sistematis.

2. *Troubleshooting*, Garansi, dan Pemeliharaan

Pada fitur ini, konsumen mendapatkan informasi tentang cara untuk mengatasi permasalahan pada produk elektronik yang mereka miliki melalui video interaktif. Melalui aplikasi RevME, konsumen juga dapat mengklaim garansi apabila terdapat kerusakan dengan menunjukkan data yang ada pada aplikasi RevME. Hal ini dapat terjadi karena pada saat awal pembelian, data produk elektronik konsumen terekam pada aplikasi RevME melalui pencatatan nomor seri. Selain itu, konsumen juga dapat menekan *button call* untuk

memperbaiki produk elektroniknya yang rusak. RevME dapat menghubungkan konsumen dengan *call center* dan teknisi pemeliharaan produk. Petugas dapat langsung datang ke rumah konsumen melalui informasi yang terdapat pada aplikasi RevME.

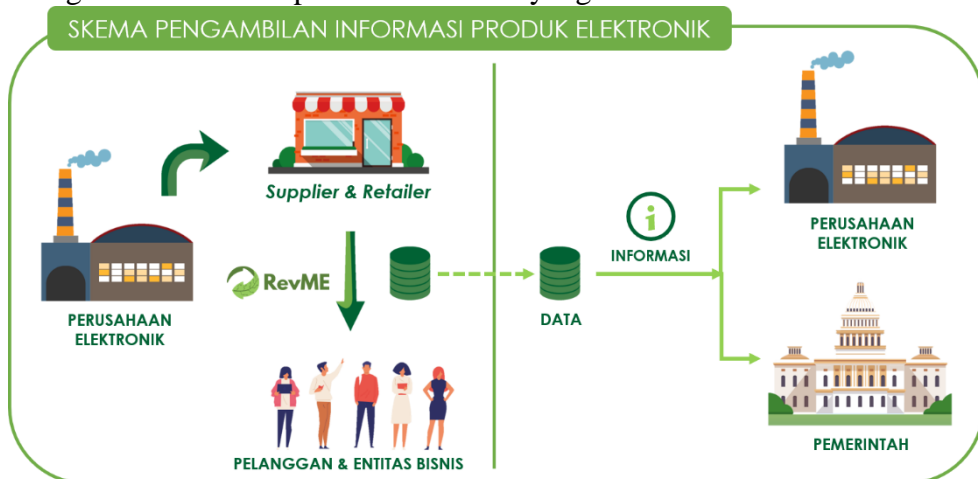
3. Informasi Keandalan Produk

Pada fitur ini, konsumen mendapatkan informasi tentang keadaan suatu produk pada waktu tertentu berdasarkan pada informasi keandalan produk yang sudah ditetapkan oleh perusahaan. Informasi ini berguna bagi konsumen untuk dapat mengetahui cara dan jadwal pemeliharaan produk elektronik seperti cara dan jadwal mengganti komponen, membersihkan komponen, dan lain-lain. Selain itu, apabila produk sudah memasuki fase *End of Life* (EOL), aplikasi RevME akan mengirimkan peringatan bagi konsumen untuk segera menukarkan produk yang dimiliki melalui aplikasi RevME.

4. Berita & *Awareness*

Pada fitur ini, konsumen mendapatkan berita seputar produk elektronik seperti perkembangan teknologi hingga informasi pentingnya mengolah limbah elektronik. Berita ini secara otomatis muncul melalui pemberitahuan pada *handphone* (HP) konsumen dan dilakukan untuk menambah pengetahuan serta *awareness* konsumen pada produk elektronik dan pengolahannya.

4.2 Mekanisme Penerapan Aplikasi RevME

Gambar 6 menampilkan skema penerapan aplikasi RevME untuk mengambil informasi produk elektronik yang beredar.

Gambar 6. Skema Pengambilan Informasi Produk Elektronik

Dalam mekanisme penerapan aplikasi RevME, terdapat skema penerapan dalam pengambilan informasi produk elektronik. Pada skema yang tertera di Gambar 6, proses pengambilan data dilakukan secara proaktif di mana data terhadap produk elektronik diambil sejak proses transaksi jual beli antara *retailer* dengan konsumen. Data yang dimasukkan adalah data detail produk seperti nomor seri dan data konsumen yaitu nama, usia, jenis kelamin, alamat, dan nomor telepon. Data ini akan dimasukkan oleh penjual pada aplikasi RevME untuk memberikan informasi tentang produk-produk elektronik yang sudah terjual dan dipakai oleh konsumen serta entitas bisnis.

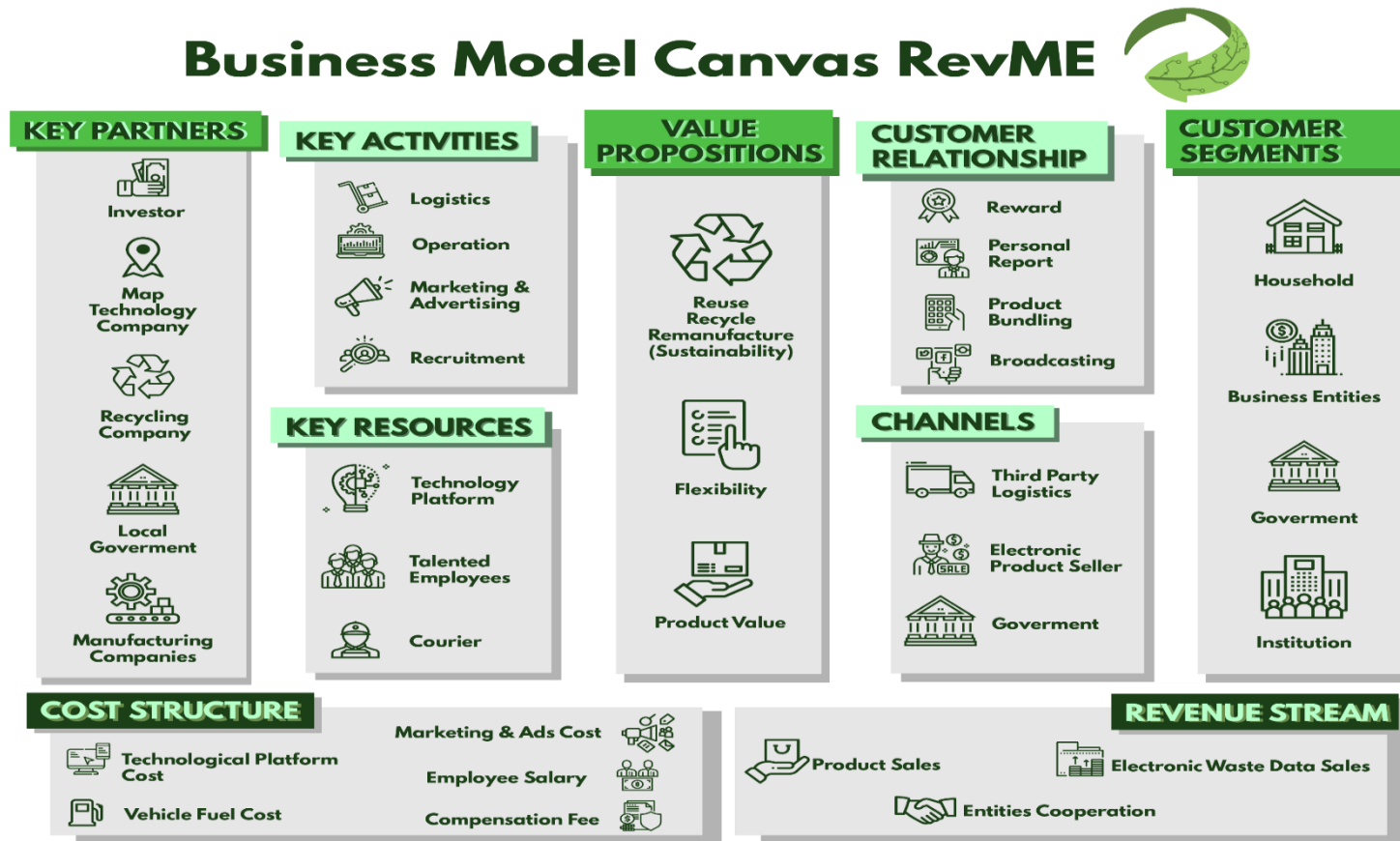
Apabila data produk elektronik yang dibeli oleh konsumen telah masuk pada basis data, sistem akan mengolah data tersebut untuk mengetahui informasi keandalan atau *reliability*. Sistem secara otomatis akan mengetahui *Mean Time to Failure* (MTTF) dan informasi keandalan produk lainnya. Informasi ini digunakan untuk mengirimkan peringatan secara interaktif pada konsumen tentang pemeliharaan produk elektronik melalui aplikasi RevME. Apabila masa hidup produk elektronik telah habis, aplikasi RevME mengirimkan peringatan agar konsumen mengembalikan produk elektronik dan memberikan informasi tentang nilai ekonomis yang akan didapatkan.

Pada skema ini, terdapat banyak data produk elektronik yang dapat diperoleh. Tabel 3 menjelaskan contoh dan potensi data produk elektronik.

Tabel 3. Potensi Data Produk Elektronik

No	Data	Potensi Informasi
1	Perilaku Pasar	Mengetahui pola dan tren pembelian produk elektronik untuk informasi perencanaan penjualan bagi perusahaan
2	Keandalan Produk	Mengetahui informasi keandalan produk elektronik yang terjual untuk informasi pengembangan produk bagi perusahaan
3	Persebaran Konsumen	Mengetahui distribusi kepadatan produk elektronik pada suatu lokasi untuk mengetahui kebijakan dan peraturan yang perlu dikeluarkan oleh pemerintah untuk konsumen dan perusahaan

4.3 Model Bisnis

Gambar 7 menampilkan model bisnis sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik dengan aplikasi RevME dan algoritma VRP.

Gambar 7. *Business Model Canvas* Sistem *Reverse Supply Chain* untuk Limbah Elektronik

Keterangan:

1. *Value Propositions*

Model bisnis dari sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik ini mengedepankan nilai keberlanjutan, daur ulang, fleksibilitas, dan nilai ekonomis produk elektronik. Fleksibilitas menjadi aspek yang dapat mendukung daya tarik konsumen karena konsumen memiliki kemudahan pada aspek fleksibilitas waktu pengambilan limbah elektroniknya melalui aplikasi RevME.

2. *Key Partners*

Bisnis ini didukung dengan beberapa mitra penting pada proses bisnisnya. Investor diperlukan untuk dapat menambah bantuan finansial perusahaan, perusahaan teknologi dibutuhkan sebagai penyedia layanan peta dan sistem basis data, perusahaan manufaktur dan pengolah limbah diperlukan untuk dapat mengolah limbah yang telah dikumpulkan.

3. *Key Activities*

Dalam operasinya, terdapat beberapa aktivitas utama yang dilakukan pada bisnis ini yaitu logistik untuk proses pengambilan dan pengiriman limbah elektronik, operasi, pemasaran dan pengiklanan, serta penerimaan tenaga-tenaga baru.

4. *Customer Segments*

Segmentasi pasar pada model bisnis ini yaitu rumah tangga, entitas bisnis, pemerintah, dan institusi seperti sekolah atau universitas.

5. *Customer Relationship*

Dalam menjaga loyalitas konsumen, bisnis ini mengimplementasikan beberapa hal seperti hadiah, laporan transaksi serta nilai ekonomis yang telah didapatkan konsumen, *product bundling* atau penawaran khusus bagi konsumen yang menukarkan suatu paket produk elektronik, dan *broadcasting* untuk memberikan berita dan peringatan agar konsumen menukarkan limbah elektronik.

6. *Key Resources*

Bisnis ini memiliki beberapa sumber daya untuk keberlanjutan bisnis seperti *platform* teknologi untuk aplikasi RevME, pegawai untuk proses operasi, dan kurir untuk mengambil barang elektornik.

7. *Channels*

Agar *value propositions* dapat tersampaikan ke konsumen, bisnis ini memiliki beberapa *channels* yaitu perusahaan logistik untuk proses pengiriman barang, pemerintah untuk menambah kewaspadaan masyarakat melalui peraturan-peraturan pada limbah elektronik, dan penjual produk elektronik.

8. *Cost Structure*

Bisnis ini memiliki beberapa struktur biaya yang harus dikeluarkan seperti biaya pemasaran dan pengiklanan, biaya kendaraan dan bahan bakar, biaya *platform* teknologi, biaya pegawai, dan biaya kompensasi untuk limbah elektronik yang dimiliki konsumen.

9. *Revenue Stream*

Bisnis ini memiliki pemasukan utama melalui penjualan limbah elektronik dan kerjasama dengan perusahaan manufaktur untuk memperoleh informasi tentang limbah elektronik. Informasi tersebut dapat bermanfaat sebagai masukan untuk perbaikan kebijakan pemerintah dan proses manufaktur industri elektronik.

4.4 Perhitungan Nilai Ekonomis

Nilai ekonomis produk elektronik dapat diraih dengan mengetahui kandungan-kandungan yang ada pada produk-produk elektronik. Kandungan yang terdapat pada produk elektronik dapat dikonversikan menjadi nilai ekonomis sesuai dengan jenis dan satuan berat masing-masing kandungan. Pada limbah elektronik, terdapat empat kandungan logam utama yang memiliki nilai ekonomis tinggi yaitu perak (Ag), emas (Au), palladium (Pd), dan tembaga (Cu). Berikut adalah tabel informasi kandungan rata-rata logam mulia pada produk elektronik (Tabel 4), harga logam (Tabel 5), dan jumlah per tahun empat jenis limbah elektronik yang dihasilkan di Indonesia (Tabel 6).

Tabel 4. Kandungan Logam Produk Elektronik

Jenis Produk	Kandungan Logam/Unit			
	Ag	Au	Pd	Cu
HP	0.25 g	0.024 g	0.009 g	9 g
PC *Desktop*	1 g	0.22 g	0.08 g	500 g
Laptop	0.97 g	0.195 g	0.07 g	450 g
TV	0.28 g	0.02 g	0.01 g	10 g

Sumber: Hagelüken dan Corti, 2010

Tabel 5. Harga Logam per Maret 2019

Jenis Logam	Harga/Gram
Perak (Ag)	Rp 7.600,00
Emas (Au)	Rp 594.301,00
Palladium (Pd)	Rp 370.000,00
Tembaga (Cu)	Rp 92,00

Sumber: INDOGOLD, 2019

Tabel 6. Data Jumlah Limbah Elektronik Indonesia

Jenis Limbah Elektronik	Jumlah (Ton/Tahun)	Jumlah (Unit/Tahun)
Handphone (HP)	4.375	5.468.750
PC Desktop	24.816	4.963.200
Laptop	7.485	2.994.000
TV	106.324	5.316.200
Total	**143.000 Ton/Tahun**	**18.742.150 Unit/Tahun**

Sumber: Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2018

Berdasarkan data di atas, nilai ekonomis sampel limbah elektronik di Indonesia dapat dihitung. Berikut adalah contoh perhitungan nilai ekonomis limbah HP. Tabel 7 menjelaskan keterangan simbol pada perhitungan nilai ekonomis.

$$\text{Nilai Ekonomis} = \frac{unit}{tahun} \times [(HAg \times KAg) + (HAu \times KAu) + (HPd \times KPd) + (HCu \times KCu)]$$

$$\text{HP} = 5.468.750\ x\ [(7.600 \times 0,25) + (594.031 \times 0,024) + (370.000 \times 0,009) + (92 \times 9)]$$

Nilai Ekonomis Limbah HP = Rp Rp 111.131.693.750,00/Tahun

Nilai Ekonomis Limbah *Handphone* = Rp 111.13 Milliar/Tahun

Keterangan:

Tabel 7. Keterangan Simbol Perhitungan Nilai Ekonomis

Simbol	Keterangan	Simbol	Keterangan	Simbol	Keterangan
HAg	Harga Ag (rupiah/gram)	HAu	Harga Au (rupiah/gram)	HCu	Harga Cu (rupiah/gram)
KAg	Kuantitas Ag (gram)	KAu	Kuantitas Au (gram)	KCu	Kuantitas Cu (gram)
HPd	Harga Pd (rupiah/gram)	KPd	Kuantitas Pd (gram)		

Perhitungan nilai ekonomis produk elektronik dapat diperoleh dengan mengalikan jumlah unit limbah elektronik yang dihasilkan per tahun dengan nilai komponen masing-masing limbah elektronik. Berikut adalah rekapitulasi perhitungan nilai ekonomis pada HP, PC *Desktop*, laptop, dan TV.

Tabel 8. Proyeksi Nilai Ekonomis Limbah Elektronik/Tahun

Produk Elektronik	Nilai Ekonomis/Tahun
HP	Rp 111.131.693.750,00
PC *Desktop*	Rp 1.061.857.879.104,00
Laptop	Rp 570.538.720.830,00
TV	Rp 99.062.177.124,00
Total	Rp 1.842.590.470.808,00
Total Nilai Ekonomis	**1,84 Trilliun/Tahun**

Berdasarkan Tabel 8, proyeksi nilai ekonomis limbah elektronik adalah **1,84 trilliun rupiah per tahun**. Nilai tersebut hanya merupakan nilai proyeksi empat sampel produk elektronik yaitu HP, PC *Desktop*, laptop, dan TV. Pada kenyataannya, nilai ekonomis limbah elektronik dapat jauh lebih tinggi dibanding proyeksi tersebut karena limbah elektronik terdiri atas berbagai macam tipe produk. Menurut data pada Tabel 6, limbah elektronik pada HP, PC *Desktop*, laptop, dan TV hanya berjumlah 143.000 ton per tahun di mana total jumlah limbah elektronik di Indonesia mencapai 1,274 juta ton pada tahun 2016. Hal tersebut menunjukkan bahwa keempat jenis limbah elektronik tersebut hanya berjumlah sekitar satu persepuluh (1/10) dari jumlah total limbah elektronik yang dihasilkan masyarakat Indonesia. Apabila dilakukan perhitungan secara pendekatan, limbah elektronik di Indonesia bernilai total sekitar **18 trilliun rupiah per tahunnya**. Besarnya nilai ekonomis limbah elektronik yang dihasilkan di Indonesia menandakan bahwa sistem pengolahan limbah elektronik yang baik sangat dibutuhkan.

Selain pada nilai ekonomis yang tertera pada Tabel 6, terdapat manfaat lain yang dapat diperoleh yaitu penurunan biaya dampak lingkungan dan kesehatan (*environmental & health cost*). Pemanfaatan limbah elektronik yang baik tentu mampu menurunkan biaya yang harus dikeluarkan untuk mengatasi masalah lingkungan dan kesehatan yang diakibatkan oleh limbah elektronik.

Berdasarkan analisis tersebut, sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik dengan aplikasi RevME dan algoritma VRP terbukti mampu untuk memberikan dampak ekonomis yang besar melalui nilai ekonomis limbah elektronik dan nilai ekonomis pada aspek biaya lingkungan dan kesehatan. Karya ini diharapkan mampu untuk membawa manfaat besar bagi bangsa Indonesia.

BAB 5
SIMPULAN DAN REKOMENDASI

5.1 Simpulan

1. Aplikasi RevME bekerja dengan mengidentifikasi data limbah elektronik konsumen. RevME dapat menerima data berupa berat, jenis, volume, dan spesifikasi limbah elektronik konsumen serta data berupa lokasi dan waktu pengambilan limbah elektronik yang diharapkan. RevME juga memiliki fitur-fitur untuk memberikan informasi produk elektronik konsumen. Untuk mengatur penjadwalan pengambilan limbah, algoritma VRP disusun menggunakan jenis *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time-Window* (CVRPTW) dengan modifikasi pemilihan konsumen.
2. Penerapan aplikasi RevME untuk memperoleh data produk elektronik konsumen dilakukan pada saat proses jual beli antara penjual dan pembeli. Data ini dapat digunakan untuk banyak hal seperti memberikan informasi & peringatan keandalan produk, mengetahui densitas permintaan pada suatu lokasi & perilaku pasar, dan mengetahui siklus hidup produk elektronik.
3. Model bisnis sistem *reverse supply chain* untuk limbah elektronik mengedepankan nilai keberlanjutan, fleksibilitas, dan nilai ekonomis limbah elektronik. Bisnis ini memiliki pemasukan melalui penjualan limbah elektronik, penjualan informasi produk elektronik, dan kerjasama dengan entitas bisnis.
4. Potensi nilai ekonomis yang dapat diraih adalah sebesar Rp 1.84 trilliun per tahun. Nilai tersebut berasal dari perhitungan pendekatan empat sampel produk yaitu TV, HP, *PC Desktop*, dan laptop. Nilai proyeksi keseluruhan limbah elektronik yang dapat dimanfaatkan oleh sistem ini adalah sebesar Rp 18 trilliun per tahun.

5.2 Rekomendasi

Diperlukan studi lebih lanjut pada perancangan kompensasi limbah elektronik konsumen, metode pengangkutan serta tata letak limbah elektronik pada kendaraan pengangkut, dan pengembangan aplikasi RevME.

DAFTAR PUSTAKA

Balakrishnan, R. B., Anand K. P., Chiya, A. B., 2007, *Electrical and electronic waste: a global environmental problem*, Journal of Waste Management and Research, vol. 25, 2007, pp. 307-317.

Baldé, C.P., Forti V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P., 2017, *The Global E-waste Monitor*, Bonn/Geneva/Vienna, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA).

BBC, 2019, *Setelah tak dipakai, bagaimana nasib barang elektronik bekas?* diakses 16 Januari 2019, <https://www.bbc.com/indonesia/majalah-39728967>.

Das, D. dan Chaudhari, R., 2015, *Reverse supply chain management in consumer electronics: an Indian perspective*. International Journal of Logistics Systems and Management. 20. 348. 10.1504/IJLSM.2015.068425.

EMPA, 2004, *E-waste Pilot Study Delhi*, Knowledge Partnerships with Developing and Transition Countries, EMPA, St. Gallen.

Garic, T., 2008, *Vehicle Routing Problem*, 1st ed. In-Teh, Croatia.

Grant, K., Goldizen, C., Fiona dan Sly, Peter dan Brune M., Neira M., MD dan Berg, Martin dan Pacella, Rosana, 2013, *Health Consequences of Exposure to E-Waste: A Systematic Review*, The Lancet Global Health. 1. e350-e361. 10.1016/S2214-109X (13)70101-3.

Guide, Jr., V.D.R. dan Wassenhove, V.L.N., 2002, *The Reverse Supply Chain*, Harvard Business Review. Vol. 80. No. 2. pp.25–26.

Hagelüken, C. dan Corti C.W., 2010, *Recycling of gold from electronics: cost-effective use through design for recycling*, Gold Bulletin 43 pp. 209-220.

International Agency for Research on Cancer (IARC), 2012, *A review of human carcinogens: chemical agents and related occupations*. IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum: 100: pp. 249–378.

INDOGOLD, 2019, *Harga Emas Hari Ini*, diakses 3 April 2019, <https://www.indogold.com/harga-emas-hari-ini>.

Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2018, *Pengelolaan Limbah B3 di Indonesia (E-Waste Management)*, diakses 3 April 2019, <https://pbde.bppi.kemenperin.go.id/files/materi/2.1-Pengelolaan-E-Waste-Bali-8-Januari-2018.pptx>.

Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2018, *Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup*, diakses 3 April 2019, <http://proper.menlhk.go.id/portal/pubpdf/ 190115030310 Publikasi %20PROPER%202018.pdf>

Kartika, H., 2008, *Limbah Komputer Korporasi dan Upaya Minimasinya (Studi Kasus: PT Bank Rakyat Indonesia, Tbk)*, Depok, Pascasarjana Universitas Indonesia.

Li X., 2015, *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows: A Case Study on Pickup of Dietary Products in Nonprofit Organization*, Arizona State University.

Nnorom, I.C., Osibanjo, O., 2008, *Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries*, Resources, Conservation and Recycling 52 (6), 843–858

Stanford Graduate School of Business, 2012, *The Social Business Model Canvas*, California, diakses 3 April 2019, <https://sehub.stanford.edu/sites/default/files </SocialBusinessMC.pdf>.

Toth dan Vigo, 2002, "*Vehicle Routing Problem*", Philadelphia, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Application.

United Nations Environment Programme (UNEP), 2007, *E-waste Vol. 1: Inventory Assesssment Manual*, Nairobi.

United Nations General Assembly, 2015, *transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, A/RES/70/1, diakses 1 April 2019, <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.

United Nations University (UNU), 2017, *Regional E-Waste Monitor: East and Southeast Asia*, United Nations University ViE – SCYCLE, Bonn, Germany.

Walkebach J., 2013, *Excel VBA for Dummies*, 3rd ed. United States, Willey Publishing.

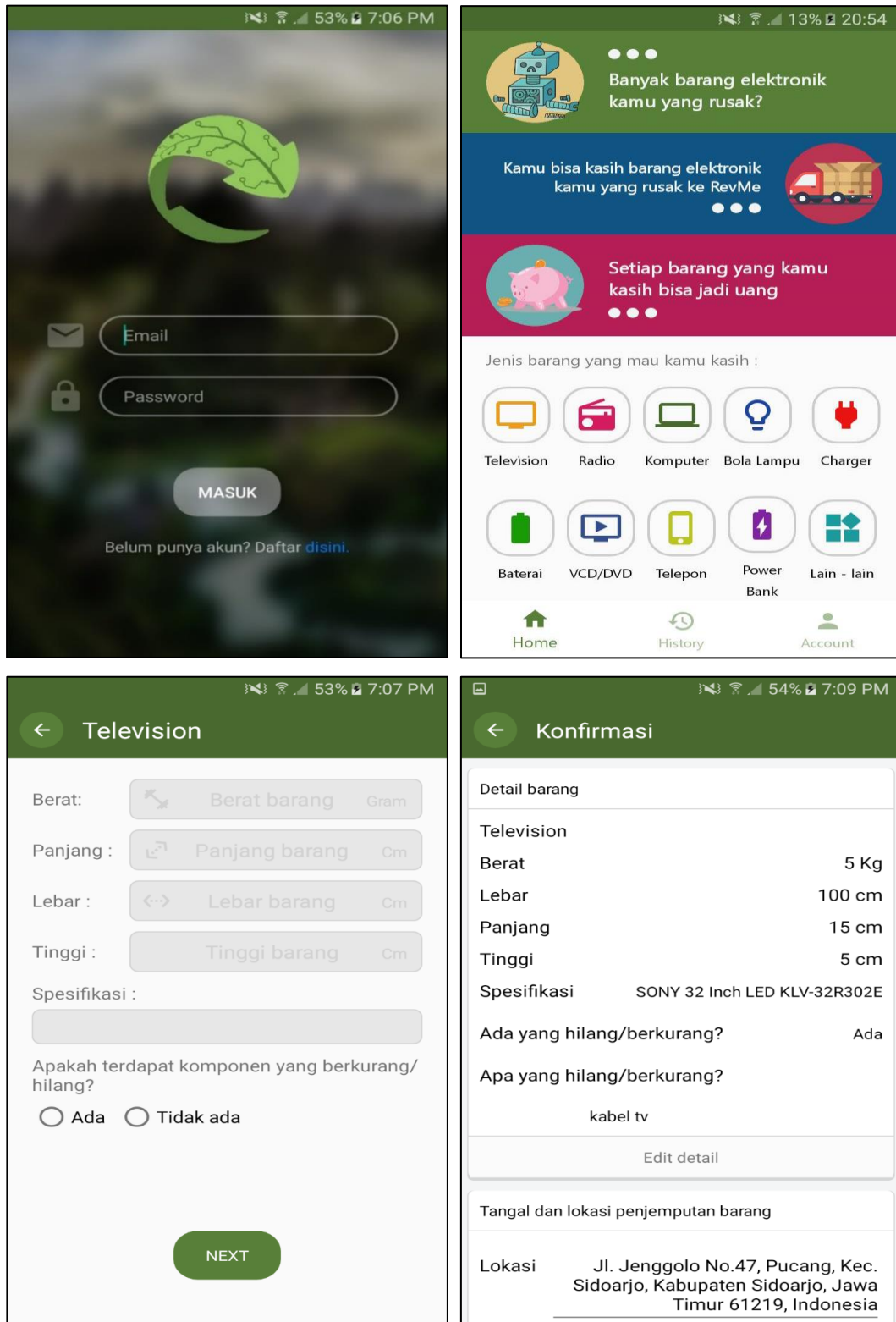
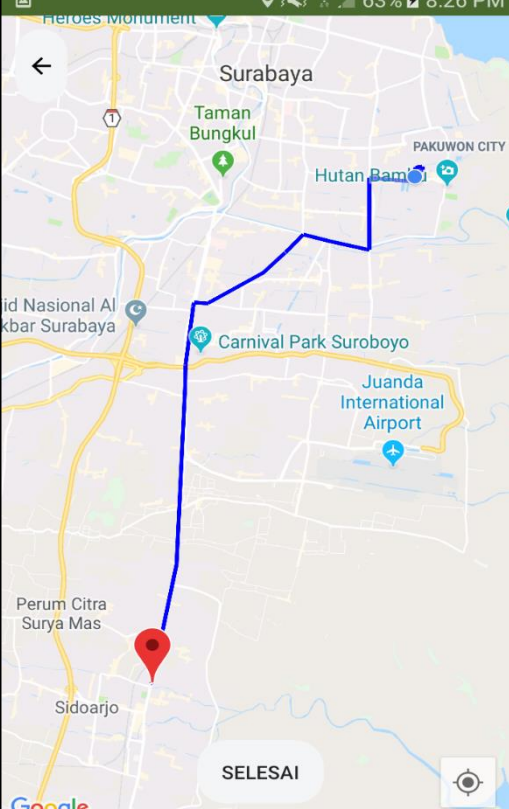
LAMPIRAN 1

Kebutuhan Fungsional Aplikasi RevME

No	Kebutuhan Fungsional	Deskripsi
Pengambilan Produk Elektronik		
1	Registrasi sebagai konsumen baru	Konsumen membuat akun dengan mengisi biodata pada proses pendaftaran pada aplikasi
2	Akun konsumen	• Konsumen memiliki informasi pribadi yang berupa nama, alamat, tanggal lahir, dan jenis kelamin • Konsumen memiliki rekening untuk penerimaan kompensasi limbah elektronik
3	Identifikasi Produk Konsumen	Konsumen memilih produk elektronik yang akan dikembalikan (TV, HP, laptop, PC, baterai, dan lain-lain) sesuai dengan limbah elektronik yang dimiliki
4	Identifikasi Pengambilan Limbah Elektronik Konsumen	Informasi yang dibutuhkan yaitu ekspektasi waktu pengambilan limbah elektronik, informasi limbah elektronik, dan alamat konsumen. Informasi pengambilan limbah elektronik diperlukan dalam pemrosesan data pada algoritma VRP untuk penjadwalan pengambilan limbah.
Pemberian Informasi Produk Elektronik		
5	Panduan Pemakaian Produk Konsumen	Konsumen dapat mengetahui cara dan prosedur pemakaian produk elektronik yang dimilkinya. Informasi ini diberikan melalui video interaktif
6	Panduan *Troubleshooting*, Klaim Garansi, dan Pemeliharaan	• Konsumen dapat mengetahui mekanisme perbaikan apabila terjadi kerusakan melalui penjelasan prosedural dan *button call* untuk menghubungkan konsumen dengan *call center* dan teknisi. • Konsumen dapat mengetahui informasi garansi beserta prosedur klaim garansi. Konsumen dapat menunjukkan informasi produk elektronik melalui aplikasi RevME pada saat melakukan klaim garansi • Konsumen dapat mengetahui prosedur pemeliharaan produk elektronik yang dimiliki

No	Kebutuhan Fungsional	Deskripsi
7	Panduan Informasi Keandalaan Produk	• Konsumen menerima beberapa peringatan informasi keandalan produk berdasarkan standar yang sudah ditetapkan perusahaan. • Konsumen menerima peringatan untuk menukarkan limbah elektronik apabila masa hidup produk sudah habis
8	Berita Seputar Produk Elektronik	• Konsumen mendapatkan informasi perkembangan teknologi terkini pada produk-produk elektronik di Indonesia dan dunia • Konsumen mendapatkan informasi tentang pentingnya mengolah limbah elektronik

LAMPIRAN 2

Desain Antarmuka Aplikasi RevME

36% 20:59
Informasi Pelanggan
Foto produk :
Tanggal Penjemputan
31 Februari 2019
Pelanggan
Aji Mumpung
085858564745
Barang
TV
Deskripsi barang
Berat 3 Kg
Panasonic 11
Komponen hilang : Kabel
SELESAI
63% 8:26 PM
Surabaya
Taman
Bungkul
PAKUWON CITY
Carnival Park Suroboyo
Juanda
International
Airport
Perum Citra
Surya Mas
Sidoarjo
SELESAI
Google

54% 7:10 PM
History
Tanggal Buat
02-Feb-19
Barang
Television
Tanggal
14/02/2019
18/02/2019
Status
belum
Tanggal Buat
09-Feb-2019
Barang
Television
Tanggal
02/14/19
02/28/19
Status
belum
Home
History
Account
54% 7:10 PM
Account
Hi,
Edit Address
Nama Lengkap
user
Nomor Telepon
user
Email
user@user.com
Alamat rumah
Jl. Jenggolo No.47,
Pucang, Kec. Sidoarjo,
Kabupaten Sidoarjo, Jawa
Home
History
Account

LAMPIRAN 3

Pengolahan Data dengan VRP dan Pemograman *Visual Basic* (Prototipe)

CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOW & CUSTOMER SELECTION

Number of Node	15
Coordinate	
Upper Limit	10
Lower Limit	0
Demand	
Upper Limit	2000
Lower Limit	200
Time Window	
Upper Limit	1200
Lower Limit	0
Vehicle Properties	
Capacity	5000
Speed	40
Unloading	10
Product Price	
Upper Limit	Rp100,000.00
Lower Limit	Rp1,000.00

Customer	Coordinate		Demand	Product Price	Time Window		Status
	x	y			Upper Limit	Lower Limit	
0	7.06	5.33	1594.53	Rp57,952.00	347	709	
1	0.14	7.61	945.26	Rp81,449.00	851	905	1
2	8.63	7.9	301.23	Rp37,354.00	1154	2200	1
3	9.5	3.64	1266.42	Rp52,487.00	921	985	1
4	4.69	2.98	702.82	Rp62,270.00	777	1094	1
5	8.3	8.25	608.36	Rp58,916.00	1183	2276	1
6	6.95	9.8	1998.95	Rp24,393.00	641	769	1
7	6.76	0.16	1637.99	Rp57,518.00	120	244	1
8	2.84	0.46	1907.43	Rp29,577.00	458	819	1
9	9.8	4.01	1363.86	Rp27,828.00	193	388	1
10	4.1	4.13	573.61	Rp71,273.00	391	1151	1
11	1.86	5.83	670.46	8071	550	1637	1
12	7.85	3.79	1329.76	28967	1103	1861	1
13	4.28	0.98	1702.67	56104	833	1929	1
14	0.23	5.43	1104.42	91616	516	1330	1
15	5.14	4.63	300.07	35347	486	810	1

CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOW & CUSTOMER SELECTION

Distance Matrix	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	9223.682	7.2859	3.0116	2.9681	3.3376	3.1724	4.4714	5.1787	6.444	3.0414	3.194	5.224	1.7308	5.1625	6.8307	2.0436
1	7.2859	9223.682	8.495	10.1671	6.4915	8.1851	7.1535	9.9663	7.6428	10.309	5.2718	2.4752	8.6044	7.8164	2.1819	5.8207
2	3.0116	8.495	9223.682	4.3479	6.3032	0.481	2.5362	7.9627	9.4275	4.0621	5.8935	7.0794	4.1834	8.1737	8.7556	4.7826
3	2.9681	10.1671	4.3479	9223.682	4.8551	4.7636	6.6669	4.4292	7.3802	0.4763	5.4222	7.9477	1.6568	5.8587	9.4412	4.471
4	3.3376	6.4915	6.3032	4.8551	9223.682	6.3879	7.1847	3.4982	3.1262	5.2128	1.2925	4.0164	3.2622	2.0416	5.0886	1.7103
5	3.1724	8.1851	0.481	4.7636	6.3879	9223.682	2.0555	8.2353	9.5129	4.4975	5.8834	6.8797	4.4826	8.3074	8.5485	4.8052
6	4.4714	7.1535	2.5362	6.6669	7.1847	2.0555	9223.682	9.6419	10.2043	6.4534	6.346	6.4552	6.077	9.2153	8.0159	5.4777
7	5.1787	9.9663	7.9627	4.4292	3.4982	8.2353	9.6419	9223.682	3.9315	4.9055	4.7788	7.4939	3.7901	2.612	8.3913	4.7545
8	6.444	7.6428	9.4275	7.3802	3.1262	9.5129	10.2043	3.9315	9223.682	7.8131	3.8803	5.4587	6.0157	1.531	5.6136	4.7622
9	3.0414	10.309	4.0621	0.4763	5.2128	4.4975	6.4534	4.9055	7.8131	9223.682	5.7013	8.1459	1.9624	6.2969	9.6748	4.7011
10	3.194	5.2718	5.8935	5.4222	1.2925	5.8834	6.346	4.7788	3.8803	5.7013	9223.682	2.812	3.7654	3.1551	4.0825	1.1539
11	5.224	2.4752	7.0794	7.9477	4.0164	6.8797	6.4552	7.4939	5.4587	8.1459	2.812	9223.682	6.3279	5.4202	1.6784	3.4926
12	1.7308	8.6044	4.1834	1.6568	3.2622	4.4826	6.077	3.7901	6.0157	1.9624	3.7654	6.3279	9223.682	4.5432	7.7945	2.8372
13	5.1625	7.8164	8.1737	5.8587	2.0416	8.3074	9.2153	2.612	1.531	6.2969	3.1551	5.4202	4.5432	9223.682	6.0171	3.7499
14	6.8307	2.1819	8.7556	9.4412	5.0886	8.5485	8.0159	8.3913	5.6136	9.6748	4.0825	1.6784	7.7945	6.0171	9223.682	4.9747
15	2.0436	5.8207	4.7826	4.471	1.7103	4.8052	5.4777	4.7545	4.7622	4.7011	1.1539	3.4926	2.8372	3.7499	4.9747	9223.682

CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOW & CUSTOMER SELECTION

Kendaraan	Route	Total Volume	Total Distance	Fuel Price	Departure
1	0 - 12-10-11-14-0	3678.25	16.8173	8479.921658	18.58972833
2	0 - 15-8-0	2207.5	13.2498	14258.93061	8.219055
3	0 - 3-4-13-0	3671.91	15.0273	22635.42824	15.5224175
4	0 - 2-0	301.23	6.0232	25192.66814	19.23333333
5	0 - 9-7-0	3001.85	13.1256	31940.61934	3.339304167
6	0 - 5-0	608.36	6.3448	34634.39935	19.71666667
7	0 - 6-0	1998.95	8.9428	38431.19924	10.68333333
8	0 - 1-0	945.26	14.5718	44617.8755	14.18333333

```
Private Sub Random_Click()
Dim n_node As Integer
Dim d_up, d_low, c_up, c_low, v_capacity As Double

n_node = Cells(3, 3)
'c = coordinate
c_up = Cells(6, 3)
c_low = Cells(7, 3)
'd = demand
d_up = Cells(10, 3)
d_low = Cells(11, 3)
'p = price
p_up = Cells(23, 3)
p_low = Cells(23, 4)
't = time window
t_up = Cells(14, 3)
t_low = Cells(15, 3)
v_capacity = Cells(18, 3)


i = 0
s = 0
While s = 0
    i = i + 1
        If Cells(7 + i, 8) <> "" Then
            Else
            s = 1
            data_number = i - 1
        End If
Wend

If data_number > 0 Then
    Sheet1.Range(Cells(8, 8), Cells(7 + data_number, 14)) = ""
End If

For i = 1 To n_node + 1
    Cells(7 + i, 8) = i - 1
    Cells(7 + i, 9) = Round(generate_random(c_up, c_low), 2)
    Cells(7 + i, 10) = Round(generate_random(c_up, c_low), 2)
    Cells(7 + i, 12) = Round(generate_random(p_up, p_low), 0)
```

```
If data_number > 0 Then
    Range(Cells(3, 2), (Cells(3 + data_number, data_number + 2))) = ""
End If

Sheet2.Cells(3, 2) = "Distance Matrix"
'Create distance_matrix
    For i = 1 To n_node + 1
        'baris
        Sheet2.Cells(3 + i, 2) = i - 1
            'kolom
            For j = 1 To n_node + 1
                Sheet2.Cells(3, 2 + j) = j - 1
            If i = j Then
                Sheet2.Cells(3 + i, 2 + j) = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(8, 9), Cells(7 + n_node, 10))) ^ 4
            Else
                x1 = Sheet1.Cells(7 + i, 9)
                y1 = Sheet1.Cells(7 + i, 10)
                x2 = Sheet1.Cells(7 + j, 9)
                y2 = Sheet1.Cells(7 + j, 10)
                Sheet2.Cells(3 + i, 2 + j) = Round(distance_formula(x1, y1, x2, y2), 4)
            End If
            Next
    Next

End Sub

Private Sub Solve_Click()
Dim n_node, v_current, start_node, next_node, current_status As Integer
    Dim v_capacity, current_capacity, total_capacity, best_distance, current_distance, _
        worst_distance, total_distance As Double

'Defining Variables
n_node = Cells(3, 3)
v_capacity = Cells(18, 3)
load_time = Cells(20, 3)
v_speed = Cells(19, 3)
worst_distance = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(8, 9), Cells(8 + n_node, 10))) ^ 4
current_matrix = Sheet2.Range(Sheet2.Cells(4, 3), Sheet2.Cells(n_node + 4, n_node + 3))
'-----------------------------------------------------------
```

```
    Sheet2.Range(Sheet2.Cells(4, 3), Sheet2.Cells(4 + n_node, 3 + n_node)) = current_matrix
    'jarak kembali ke depot
    best_distance = Sheet2.Cells(4 + start_node, 3)
    v_route = v_route & 0
    total_distance = total_distance + best_distance
    Sheet3.Cells(4 + v_current, 3) = v_route
    Sheet3.Cells(4 + v_current, 4) = total_capacity
    Sheet3.Cells(4 + v_current, 5) = total_distance
    v_current = v_current + 1
    start_node = 0
    Sheet2.Range(Sheet2.Cells(4, 3 + start_node), Sheet2.Cells(4 + n_node, 3 + start_node)) = worst_distance
    total_distance = 0
    total_capacity = 0
    v_route = "0 - "

ElseIf total_capacity + current_capacity > v_capacity Or _
    current_status > 0 Or _
    current_depart + best_timetravel < current_open Or _
    current_depart + best_timetravel > current_close Then
    Sheet2.Range(Sheet2.Cells(4, 3 + next_node), Sheet2.Cells(4 + n_node, 3 + next_node)) = worst_distance

Else
    v_route = v_route & next_node & "-"
    total_distance = total_distance + best_distance
    total_capacity = total_capacity + current_capacity
    current_depart = current_depart + best_timetravel
    fuel_price = best_distance * 849.13
    total_price = total_price + fuel_price
    Sheet3.Cells(4 + v_current, 3) = v_route
    Sheet3.Cells(4 + v_current, 4) = total_capacity
    Sheet3.Cells(4 + v_current, 5) = total_distance
    Sheet3.Cells(4 + v_current, 6) = total_price
    Sheet3.Cells(4 + v_current, 7) = current_depart / 60
    start_node = next_node
    Sheet2.Range(Sheet2.Cells(4, 3 + start_node), Sheet2.Cells(4 + n_node, 3 + start_node)) = worst_distance
    Cells(7 + start_node + 1, 15) = 1 'status
End If
Wend
End Sub
```